نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد 8، شماره 1، نیمسال اول 1397، ص 91-79

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 1, Spring - Summer 2018, p. 79-91

اثر سرعت جریان هوا بر فرآیند پیش‌خنک‌کاری انار با هوای سرد اجباری در انتقال حرارت ناپایا

محمدعلی به‌آئین[1*] - اصغر محمودی[2] - سید فرامرز رنجبر[3]

تاریخ دریافت: 1394/05/14
تاریخ پذیرش: 1394/12/04

چکیده

کاهش دما در محصولات باغبانی به‌وسیله عمل پیش‌خنک‌کاری باعث کاهش تنفس و فعالیت میکروارگانیسم‌ها و افزایش کیفیت محصول می‌شود. استفاده از هوای فشرده برای خنک‌کاری محصولات زیادی از جمله محصولات نیمه‌گرمسیری مثل انار انجام می‌شود. به همین منظور، در پژوهش حاضر سرعت جریان هوای سرد به‌عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار بر خنک کردن محصول در سه سطح 0/5، 1 و $1/3\ m\ s^{-1}$ و دمای 7/2 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. متغیرهای سرد شدن شامل فاکتور تأخیر، ضریب سرد شدن از داده‌های آزمایشی محاسبه و سپس زمان نیمه سرد شدن و هفت- هشتم سرد شدن در مرکز و لایه پوست انار به‌دست آمد. غیریکنواختی سرد شدن، شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای و ضریب انتقال حرارت همرفتی نیز در این دو لایه و در سرعت‌های مختلف تجزیه و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که افزایش سرعت هوا از 0/5 به $1/3\ m\ s^{-1}$ باعث کاهش زمان نیمه سرد شدن و هفت- هشتم سرد شدن می‌گردد. بعد از 5000 ثانیه، تغییرات سرعت اثر کمی بر کاهش دمای مرکز و پوست انار بر جای گذاشت. غیریکنواختی سرد شدن در سرعت $0/5\ m\ s^{-1}$ کم، در سرعت $1\ m\ s^{-1}$ افزایش و در نهایت، در سرعت $1/3\ m\ s^{-1}$ کاهش یافت. افزایش سرعت جریان هوای سرد باعث افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی شد که حداکثر این ضریب در سرعت $1/3\ m\ s^{-1}$ به‌دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش سرعت (در این آزمایش از 0/5 تا $1/3\ m\ s^{-1}$)، می‌تواند دو هدف سرعت خنک‌کاری (کاهش زمان نیمه و هفت- هشتم سرد شدن) و افزایش یکنواختی توزیع دما در انار را تأمین نماید.

واژه‌های کلیدی: انار، انتقال حرارت ناپایا، پیش‌خنک‌کاری، نرخ سرد شدن

مقدمه

میوه انار با نام علمی *Punica grantum* L. و از خانواده پونیکاسه است[4] (Fadavi *et al.*, 2006). ایران منشأ اصلی انار بوده و از نظر تنوع، سطح زیر کشت و تولید (600 هزار تن) مقام اول دنیا را دارا می‌باشد (Mohseni, 2009). این محصول به دلیل کیفیت مرغوب از مهمترین میوه‌های تجاری ایران و از نظر اقتصادی دارای اهمیت فراوان است. به‌منظور عرضه خارج از فصل در بازارهای داخلی و صادرات، مسأله نگهداری و کنترل عوامل مؤثر در کاهش کیفیت انار از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از مهمترین فاکتورهای تأثیرگذار در عمر پس از برداشت و کیفیت محصولات باغبانی، دما است. از دست دادن کیفیت پس از برداشت، به‌عنوان نتیجه‌ای از فرآیند فیزیولوژیکی و بیولوژیکی اتفاق افتاده و میزان آن به‌وسیله دمای محصول تعیین می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که به‌ازای هر 10 درجه سانتی‌گراد کاهش در دما، تنفس 4-2 برابر کاهش می‌یابد (Golob *et al.*, 2002). به‌منظور حفظ کیفیت و بازارپسندی، ضروری است که نه تنها محصول سرد شود، بلکه سرد شدن سریع و بلافاصله پس از برداشت انجام گردد (Brosnan and Sun, 2001). فرآیند پیش‌خنک‌کاری، رفع نمودن گرمای مزرعه به‌عنوان یک مرحله پیچیده از مدیریت دما می‌باشد که از فسادپذیری و پیری محصول جلوگیری می‌کند. دستیابی به اهداف فوق کیفیت میوه‌ها و سبزی‌ها را افزایش می‌دهد (Dincer and Dost, 1996). تفاوت بین پیش‌خنک‌کاری و خنک‌کردن این است که پیش‌خنک‌کاری، هرگونه شیوه زدودن سریع‌تر گرمای محیط در مقایسه با شیوه‌ای است که محصول را به‌طور ساده در یک مجموعه اتاقک سردخانه و در دمای دلخواه قرار داده تا خنک شود. پیش‌خنک‌کاری به‌طور چشمگیری

1 و 2- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
3- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: ali_behaeen@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.v8i1.48911
4- Punicaceae

مدت ذخیره‌سازی میوه‌ها و سبزی‌ها را طولانی‌تر می‌کند. در بیشتر اوقات، اگر وسایل جایگزین استفاده نشود، ممکن است چند روز طول بکشد تا محصول به دمای نهایی سردخانه برسد. بنابراین، فرآیند پیش‌خنک‌کاری، فناوری مجزایی نسبت به سرد کردن معمول در سردخانه می‌باشد (Iranmanesh and Malekyarand, 2012).

پیش‌خنک‌کاری در مورد انار با اهداف کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های فاسدکننده و جلوگیری از خراب‌شدن میوه و همچنین، جلوگیری از افزایش واکنش‌های بیوشیمیایی میوه صورت می‌پذیرد. چنانچه دمای انار را در باغ کاهش نداده باشند، به محض رسیدن آن به سردخانه، باید دمای میوه را تا 10 درجه سانتی‌گراد پایین آورد. همچنین، پیش‌خنک‌کاری باید قبل از درجه‌بندی و بسته‌بندی انجام گیرد.

روش‌های پیش‌خنک‌کاری براساس فاکتورهایی مثل زمان خنک‌کاری، تماس آب با محصول، کارایی انرژی مصرفی و میزان از دست دادن آب محصول با یکدیگر تفاوت دارند. بنابراین، روش‌های خنک‌کاری با درنظرگرفتن ملاحظات فوق به روش‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند: الف) خنک‌کاری با هوای تحت فشار، ب) خنک‌کاری در اتاق، ج) خنک‌کاری تحت خلاء، د) خنک‌کاری با آب، ه) خنک‌کاری با یخ و و) خنک‌کاری با تبخیر (Brosnan and Sun, 2001). متداول‌ترین روش سردکردن محصولات نیمه‌گرمسیری مثل انار، روش استفاده از هوای فشرده است (Kader, 2002). در سردکردن با هوای سرد اجباری، گرما به‌وسیله روش همرفت اجباری بین سیال سردکننده و جسم جامد انتقال می‌یابد (Dincer, 1993; Smale *et al.*, 2006; Zou *et al.*, 2006 a,b). سرعت خنک‌کاری با هوای تحت فشار 10 -4 برابر بیشتر از خنک‌کاری در اتاق و نصف خنک‌کاری با آب است. محدودیت‌های استفاده از این روش، کاهش وزن محصول و طراحی نامناسب سیستم خنک‌کننده می‌باشد که می‌تواند عدم کارایی و هزینه‌های استفاده از این روش را افزایش دهد (Thompson *et al.*, 1998).

عوامل زیادی روی پیش‌خنک‌کاری محصولات تأثیر دارند. در این ارتباط، سرعت هوای سرد یکی از فاکتورهای مؤثر در سردکردن میوه‌ها و سبزی‌ها است (Fikiin, 1983). همچنین، نشان داده شده است که نرخ سرد شدن در یک سیستم خنک‌کاری با هوای سرد تحت فشار، در درجه اول به سرعت هوای سرد که به محصول برخورد می‌کند، بستگی دارد و این تنها پارامتر قابل کنترل در بین سایر متغیرها است؛ زیرا عواملی مثل اندازه، شکل و خصوصیات فیزیکی محصول غیرقابل تغییر هستند (Hass, 1976; Dennis, 1984). دمای هوای سرد نیز یک عامل محدودکننده بوده و نمی‌تواند به پایین‌تر از یک نقطه معین به دلیل ایجاد یخ‌زدگی کاهش یابد. در یک مطالعه گزارش شد که افزایش سرعت هوا از 0/2 به $3/65\ m\ s^{-1}$، زمان خنک شدن محصول کیوی را 3 تا 6 برابر بر اساس نوع بسته‌بندی کاهش می‌دهد (Lambrinos *et al.*, 1997). در همین راستا در پژوهشی دیگر گزارش شد که زمان هفت- هشتم سرد شدن با افزایش حجم جریان هوا به ازای هر کیلوگرم محصول از 0/002 به $0/004\ m^{-3}\ s^{-1}\ kg^{-1}$ محصول، 40-30 % کاهش پیدا کرد (Emond *et al.*, 1996). سرد شدن سریع محصول یکی از مزایای استفاده از سردکردن با هوای سرد اجباری است که می‌توانند با تغییر سرعت هوای سرد، نرخ سرد شدن را افزایش دهد. در آزمایش‌هایی که روی سرد شدن پرتقال و گوجه‌فرنگی انجام شد، مشخص شد که با افزایش سرعت هوای سرد، مقدار ضریب سرد شدن (C) افزایش می‌یابد؛ اما پارامتر فاکتور تأخیر (J) در دامنه 1/14-1/09 برای پرتقال و 1/11-1/08 برای گوجه‌فرنگی تقریباً ثابت باقی ماند. همچنین، زمانی که سرعت هوا از 1/2 به $4/4\ m\ s^{-1}$ افزایش پیدا کرد، ضریب سرد شدن تا 38% برای پرتقال و 78% برای گوجه‌فرنگی تغییر نمود. علاوه بر این، نتایج در مورد انتقال حرارت پرتقال و گوجه‌فرنگی در دمای 5-4 درجه سانتی‌گراد و دامنه سرعتی $1/2\text{-}4/4\ m\ s^{-1}$ نشان داد که سرعت هوا تأثیر معنی‌داری روی نرخ سرد شدن محصول در دمای بی‌بُعد 0/6 دارد. در 40 دقیقه اول شروع آزمایش، افزایش سرعت بیش از $3/5\ m\ s^{-1}$ برای پرتقال و $2/6\ m\ s^{-1}$ برای گوجه‌فرنگی تأثیری در نرخ سردشدن نداشت. بعد از 40 دقیقه از شروع پیش‌خنک‌کاری، سرعت هوای سرد می‌توانند تا $1/6\ m\ s^{-1}$ برای پرتقال و $1/2\ m\ s^{-1}$ برای گوجه‌فرنگی کاهش یابد. افزایش در سرعت هوای سرد بالاتر از مقادیر فوق، تأثیر معنی‌داری روی نرخ سرد شدن نداشت (Kumar *et al.*, 2008). در یک پژوهش پیش‌خنک‌کاری در مورد یک لایه انگور واریته سولتانا[1] مورد بررسی قرار گرفت. دمای هوا 4 درجه سانتی‌گراد و سرعت جریان هوا 1 و $2\ m\ s^{-1}$ بود. متغیرهای سرد شدن از قبیل فاکتور تأخیر، ضریب سرد شدن، زمان نیمه و هفت- هشتم سرد شدن آزمایش گردید. نتایج نشان داد که متغیرهای ذکر شده به سرعت جریان هوا وابسته هستند و با افزایش سرعت هوا از 1 به $2\ m\ s^{-1}$، زمان نیمه سرد شدن تا 21/8% و زمان هفت- هشتم سردشدن تا 23/6 % کاهش یافت (Dincer, 1995a). در تحقیقی پارامترهای سردشدن و انتقال حرارت در هلو و گوجه‌فرنگی به‌عنوان اجسام کروی و در خیار به‌عنوان جسم سیلندری شکل با جریان هوای سرد اجباری در سرعت‌های بین 1، 1/25، 1/5، 1/75 و 2 $m\ s^{-1}$ بررسی گردید. دمای میوه‌های فوق در مرکز میوه اندازه‌گیری شد. ضریب سردشدن، فاکتور تأخیر و زمان نیمه و هفت- هشتم سردشدن محاسبه گردید. زمان نیمه و هفت- هشتم سردشدن با افزایش در وزن میوه‌ها در جعبه‌های 5-20 kg افزایش و با افزایش سرعت هوا از $1\text{-}2\ m\ s^{-1}$ کاهش یافت. زمان‌های نیمه و هفت - هشتم سردشدن تقریباً به‌صورت خطی با

1- Soltana

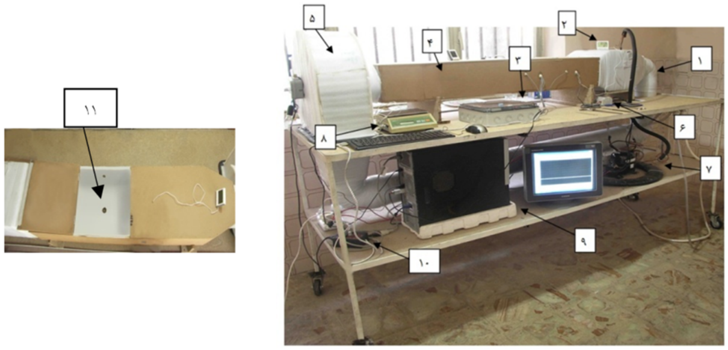
وزن محصول تغییر نمود و بنابراین در محیط انتقال حرارت، به میزان وزن محصولی که سرد می‌شود، بستگی دارد. این میزان کاهش در مورد گوجه‌فرنگی 27%، هلو 28/2% و برای خیار 32/6% بود. این تغییرات و به‌خصوص کاهش در پارامترهای سرد شدن با افزایش در سرعت جریان هوا، نشان می‌دهد که پروفیل‌های دما و جریان به‌همراه خصوصیات گرمایی و فیزیکی اطراف هوای محصول تحت تأثیر سرعت جریان هوا هستند و برای هر آزمایش مختلف است (Dincer, 1995b). در آزمایشی انتقال حرارت در اجسام کروی و سیلندری شکلی که در معرض جریان هوا قرار داشتند، مورد مطالعه گرفت. تئوری مسأله با فرض انتقال حرارت یک بعدی در جهت شعاعی در نظر گرفته شد که سطح جسم در معرض خنک‌کاری همرفتی قرار داشت. از گوجه‌فرنگی و هلو به‌عنوان اجسام کروی و از خیار به‌عنوان جسم سیلندری شکل استفاده شد. دامنه سرعت هوا $1-2\ m\ s^{-1}$ بود. نتایج نشان داد که با به‌دست آوردن همبستگی بین عدد رینولدز و ناسلت، می‌توان ضریب انتقال حرارت همرفتی را در محصولات در هنگام سردشدن تعیین نمود (Dincer, 1997). در یک تحقیق گزارش گردید که در خنک‌کاری با هوای سرد اجباری باید به دو متغیر توجه داشت. یکی متغیرهای سیستم خنک‌کننده و دوم متغیرهای محصول. فن مورد استفاده بهتر است از نوع سانتریفوژ یا فن محوری باشد. متغیرهای محصول شامل نوع و مقدار محصولی که باید خنک شود و نرخ سردسازی مورد نیاز بود. میزان جریان هوا $0/001 - 0/003\ m^3\ s^{-1}\ kg^{-1}$ محصول در نظر گرفته شد (Anon, 1994; Lindsay *et al.*, 1983; Guillou, 1970). تعیین پروفیل‌های زمان- دما، گام مهمی در فرآیند خنک‌کاری محصولات کشاورزی است. همچنین، نرخ انتقال حرارت می‌تواند به‌طور مستقیم از تغییرات منحنی‌های زمان– دما به‌دست آید (Kumar *et al.*, 2008). این منحنی‌ها به‌منظور طراحی دستگاه‌های خنک‌کننده، بهینه نمودن عملکرد، تعیین شرایط محصول در سردخانه و پیشگویی پایداری و کیفیت محصول نهایی کاربرد دارد (Dincer, 1996).

بررسی انتقال حرارت روی یک انار تکی نتایج دقیق‌تری را در مورد رفتار میوه در زمان سرد شدن ارائه می‌دهد. فرآیند پیش‌خنک‌کاری محصولات همانند سایر فرآیندهای فرآوری پس از برداشت، انرژی زیادی مصرف می‌کند. بنابراین، اگر بتوان زمان سردکردن محصولات را کاهش و نقطه بهینه اثرگذاری فرآیند سردکردن را تعیین نمود، می‌توان به کاهش مصرف انرژی کمک کرد. با توجه به این که قسمت‌های مختلف انار با نرخ یکسان سرد نمی‌شوند، این تحقیق با هدف تجزیه و تحلیل نرخ سرد شدن در مرکز و پوست انار و مقایسه این دو قسمت در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد انجام شد. نتایج می‌تواند به‌عنوان راهنمایی در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های پیش‌خنک‌کاری محصولات به‌منظور افزایش کارایی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها و مراحل انجام فرآیند خنک کاری

رقم انار مورد استفاده در پژوهش حاضر رقم رباب بود که در طبقه‌بندی انواع انارهای موجود، جزء ارقام پوست ضخیم به‌شمار می‌رود و از نظر صادرات و بازارپسندی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای انجام آزمایش، انار رقم رباب از فاروق شهرستان مرودشت استان فارس تهیه گردید. آزمایش‌های مورد نظر روی مرکز و پوست (لایه بیرونی) انار انجام گرفت. اندازه‌گیری رطوبت در مرکز و پوست انار با قراردادن نمونه‌های مورد نظر به مدت 24 ساعت در آون با دمای 105 درجه سانتی‌گراد انجام شد (AOAC, 1980). رطوبت مرکز و پوست میوه به‌طور متوسط 81/87 و 73/02% بر اساس وزن تر تعیین گردید. متوسط دمای هوای درون تونل و دمای محصول به‌ترتیب 0/2 ±7/2 درجه سانتی‌گراد و 0/4± 22/2 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. سرعت هوا با استفاده از یک بادسنج سیم داغ (Lutron-YK, 80AM,Taiwan) و یک وسیله کنترل تغییر سرعت (Dimmer, 220 V, 2000 W, 48×36×27 mm, Iran) اندازه‌گیری و سپس، سرعت‌های 0/5، 1 و $1/3\ m\ s^{-1}$ برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید (باتوجه به طراحی دستگاه برای آزمایش روی یک انار تکی، در حداکثر دور فن، سرعت $1/3\ m\ s^{-1}$ به‌دست آمد و بنابراین این سرعت به‌عنوان سرعت بیشینه درنظر گرفته شد). برای انجام عملیات پیش‌خنک‌کاری، دستگاهی در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز ساخته شد. این دستگاه شامل فن سانتریفوژ یک وارد (BEB-30/10L4S, Single Inlet, 30×10 mm, 220V, 1400 RPM, 160W, 50 Hz, 14.3 kg, 1600 $m^3\ h^{-1}$, Iran)، تونل هوا و یک سیستم خنک‌کننده کمپرسوری شامل یک کمپرسور (LG, CMAO69LAEM, 220 V, 119 W, 50Hz, R134a, C.O.P 1.61, South Korea)، کندانسور (Condenser, 1/4 hp, Pipe volume: 0.4 dm^{-3}, Surface heat transfer: 2.05 m^{-2}, CFM: Max 560 & Min 300, Iran)، تبخیرکننده و شیر انبساط بود که جزئیات آن در شکل 1 نشان داده شده است. به‌منظور استفاده بهینه از انرژی در سرد کردن هوایی که در دستگاه گردش می‌کرد، از یک لوله پلی‌اتیلن به قطر 0/15 m استفاده گردید. در هر آزمایش، چهار سنسور pt100 (طول 0/003m، عرض 0/002m و ارتفاع 0/001m، دامنه دمایی 840+ تا 200- درجه سانتی‌گراد، جومو، آلمان) در یک انار تکی استفاده گردید. دو سنسور در مرکز و دو سنسور در پوست انار قرار داده شد. دو سنسور دیگر نیز در ابتدا و انتهای تونل هوا (قبل و بعد از نمونه)، دمای ورود و خروج هوا را ثبت نمودند.



شکل 1- دستگاه پیش‌خنک‌کاری با جریان هوای سرد اجباری (1- لوله گردش هوا، 2- نشانگر رطوبت نسبی، 3- رابط سنسورها، 4- تونل هوا، 5- فن سانتریفوژ بک وارد، 6- ترموستات، 7- سیستم سردکننده، 8- ترازوی دیجیتال، 9- واحد پردازش، 10- کنترل‌کننده سرعت هوا، 11- محل قرارگیری نمونه در تونل هوا)

Fig. 1. Experimental set up of the forced air cooling (1. Air circulating pipe, 2. Relative humidity indicator, 3. Interface, 4. Air tunnel, 5. Backward centrifugal fan, 6. Thermostat, 7. Cooling system, 8. Digital scale, 9. Microprocessor unit, 10. Controllable air velocity equipment, 11. Location of sample in the air tunnel)

محل قرارگیری سنسورها، درون نمونه با چسب عایق‌بندی گردید. سنسورهای مورد استفاده دما را در هر ثانیه ثبت می‌کردند. دقت هر سنسور 0/1± درجه سانتی‌گراد بود و دماهای هر سنسور نیز به‌طور جداگانه در برنامه Labview, 2010 ثبت گردید. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها در یک محیط همگن از نظر دمایی (23 درجه سانتی‌گراد) به مدت 15 ساعت قرار داده شد تا تمام قسمت‌های نمونه از نظر دمایی تقریباً یکسان گردد. سپس نمونه مورد نظر روی یک پایه در درون تونل قرار گرفت و دستگاه برای انجام عملیات خنک‌کاری شروع به‌کار کرد. سرد شدن انار تا رسیدن دمای مرکز انار به10 درجه سانتی‌گراد ادامه یافت. متوسط دمای درون تونل به‌وسیله یک ترموستات دیجیتال (220 V, 50 Hz, Temperature Range 0-150, On delay 1-60 s, Off delay 1-60 s, Shiva amvaj, Iran) تنظیم گردید.

1- فرضیات در نظر گرفته شده برای مطالعه فرآیند خنک‌کاری طی انتقال حرارت ناپایا[1] عبارتند از:

2- نمونه‌های آزمایش همگن و ایزوتروپ هستند.

دما و رطوبت محصول در لایه‌های مختلف یکنواخت هستند.

3- خصوصیات ترموفیزیکی و دمای هوا در تونل ثابت هستند.

4- در زمان انجام آزمایش، ضریب هدایت حرارتی، نفوذ گرمایی و ظرفیت گرمایی ویژه محصول ثابت می‌باشند.

5- از گرمای حاصل از تنفس به دلیل سرد شدن سریع محصول صرف‌نظر می‌شود.

6- مقادیر ضرایب انتقال حرارت همرفتی برای شرایط انجام این آزمایش کاربرد دارند (Nalbandi *et al*., 2014).

خصوصیات گرمایی مواد غذایی به میزان بسیار زیاد به رطوبت آن‌ها وابسته است. ضریب هدایت گرمایی با استفاده از رابطه (1) محاسبه گردید (Dincer, 1996):

$$k = (0.148 + 0.493 \times W) \qquad (1)$$

k: ضریب هدایت گرمایی (W m^{-1} °C^{-1})، W: محتوای رطوبتی (اعشاری)

ظرفیت گرمایی ویژه نیز از مدلی که فیکین (Fikiin, 1983) ارائه نمود، طبق رابطه (2) به‌دست آمد:

$$c_p = (1.381 + 2.930 \times W) \times 1000 \qquad (2)$$

c_p: ظرفیت گرمایی ویژه (J kg^{-1} °C^{-1})، W: محتوای رطوبتی (اعشاری)

جرم مخصوص ظاهری انار نیز از نسبت جرم به حجم به‌دست آمد. ضریب هدایت حرارتی، جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت گرمایی ویژه انار مورد آزمایش عبارت بود از: ρ_p=970 kg m^{-3}, k m^{-1}°C^{-1} c_p =3606.07 J kg^{-1} °C^{-1} =0.52 W,

تجزیه و تحلیل داده‌ها

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار (سرعت‌های 0/5، 1 و 1/3 ms^{-1}) در پنج تکرار انجام و مقایسه میانگین‌ها به‌وسیله آزمون دانکن انجام شد. به‌منظور تجزیه و تحلیل

1- Unsteady heat transfer

فرآیند پیش‌خنک‌کاری، محاسبات سرد شدن محصول لازم است. دمای بی‌بُعد (θ) طبق رابطه (3) به‌عنوان نسبت اختلاف دمای لحظه‌ای (T) محصول و دمای هوای خنک‌کننده (T_a) به اختلاف دمای اولیه محصول (T_i) و دمای هوای خنک‌کننده تعریف می‌شود (Dincer, 1995a).

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} \tag{3}$$

دمای بی‌بعد می‌تواند بر اساس رابطه (4)، برحسب پارامترهای ضریب سرد شدن (C) و فاکتور تأخیر (J) تعریف شود (Thompson *et al.*, 1998).

$$\theta = J\exp(-Ct) \tag{4}$$

ضریب سرد شدن (C)، بیان‌کننده توانایی سرد شدن یک محصول است و از نسبت تغییر دمای فرآورده در واحد زمان در هر لحظه (R) به اختلاف دمای میان فرآورده و ماده خنک‌کننده (dT) به‌دست آمده و مقدار آن منفی است (رابطه 5). همچنین، این ضریب شیب منحنی سرد شدن است (Kumar *et al.*, 2008).

$$C = R / dT \tag{5}$$

فاکتور تأخیر بیان‌کننده یک مقاومت داخلی به انتقال حرارت محصول به اطراف آن است (Dincer, 1995a). این دو پارامتر به‌وسیله برازش داده‌ها در منحنی دمای بی‌بعد و زمان به‌دست می‌آید. مقدار فاکتور تأخیر (J)، بین 1 و 2 در وسط نمونه خنک‌شونده می‌باشد. نرخ سرد شدن با زمان نیمه سرد شدن (H) و هفت- هشتم سرد شدن (S) مشخص می‌شود. با قراردادن θ=0/5 و θ = 0/125 در رابطه 4 زمان نیمه و هفت- هشتم سرد شدن به‌صورت روابط (6) و (7) محاسبه می‌شود:

$$H = [\ln(2J)/C] \tag{6}$$

$$S = [\ln(8J)/C] \tag{7}$$

زمان نیمه سرد شدن در کاربردهای عملی (Dincer, 1995a) و زمان هفت- هشتم سرد شدن در کاربردهای تجارتی کاربرد دارند. زمان هفت- هشتم سرد شدن نزدیک به دمای مورد نیاز انبار یا حمل و نقل بوده و برابر سه زمان نیمه سرد شدن است (Guillou, 1960). این دو پارامتر مستقل از دمای اولیه محصول بوده و در طول زمان خنک‌کردن محصول ثابت خواهند ماند. به این معنا که اگر در محصولی دو ساعت زمان لازم باشد تا اختلاف دمای محصول و هوای سرد به 50٪ مقدار اولیه برسد (H)، دو ساعت دیگر زمان لازم خواهد بود تا اختلاف دمای جدید محصول و هوای سرد به 25٪ مقدار اولیه برسد ($2H$) و مجدد دو ساعت دیگر زمان لازم خواهد بود تا اختلاف دمای جدید محصول و هوای سرد به 12/5٪ مقدار اولیه برسد ($3H$). مجموع سه زمان نیمه سردشدن، معادل زمان هفت- هشتم سردشدن است. بنابراین این روند هیچ ارتباطی با دمای اولیه محصول نخواهد داشت.

غیریکنواختی سرد شدن

به‌منظور تأثیر سرعت‌های مختلف بر خنک شدن یکنواخت و توزیع دما در محصول، پارامتر غیریکنواختی سرد شدن محاسبه گردید. این شاخص می‌تواند در طول زمان سرد شدن و در زمان‌های مشخصی در هر نقطه از محصول محاسبه گردد (Dehghannya *et al.*, 2011). بنابراین این پارامتر در نقاطی که سنسورها در پوست و مرکز انار جایگذاری شده بود، با توجه به رابطه (8) محاسبه گردید.

$$\text{غیر یکنواختی سرد شدن} = S_d / \overline{T} \tag{8}$$

S_d: انحراف استاندارد دماهای لحظه‌ای (ºC)، $\overline{T}$: متوسط دمای لحظه‌ای (ºC)

افت وزن میوه

جهت ارزیابی تأثیر عملیات پیش‌خنک‌کاری در کاهش وزن، هر میوه قبل از انجام آزمایش به‌وسیله یک ترازوی دیجیتالی (DB152-CXOZA 10AAR, 1500, 220/240 V, 50/60 Hz, The United Kingdom) با دقت 0/01± گرم و پس از قراردادن در تونل هوای سرد وزن شد. درصد کاهش وزن از نسبت تفاضل وزن اولیه (W_i) و وزن ثانویه (W_f) به وزن اولیه به‌دست آمد (رابطه 9).

$$\text{درصد کاهش وزن} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \tag{9}$$

شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای

به‌منظور بررسی اثر سرعت جریان هوای سرد بر افزایش کارایی فرآیند خنک‌کاری، پارامتر شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای در مرکز و پوست انار مورد بررسی قرار گرفت. این پارامتر بیان‌کننده میزان دمای از دست رفته محصول در واحد زمان می‌باشد و از رابطه (10) محاسبه می‌گردد (Askari Ardeh-Asli, 2006):

$$\text{شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای} = \frac{2.08(T - T_m)}{S} \tag{10}$$

T: درجه‌حرارت لحظه‌ای محصول (ºC)، T_m: درجه‌حرارت خنک‌کنندگی متوسط (ºC)، S: زمان هفت- هشتم سرد شدن (s)

ضریب انتقال حرارت همرفتی

ضریب انتقال حرارت همرفتی با نوع شارش (لایه‌ای یا متلاطم)، شکل هندسی جسم، سطح مسیر شارش، خواص فیزیکی شاره، دمای متوسط، مکان مورد نظر در سطح جسم و مکانیزم انتقال گرمای اجباری یا طبیعی تغییر می‌کند. در شکل‌های هندسی پیچیده، برای تعیین این ضریب از روش تجربی استفاده می‌شود. در این تحقیق، ضریب انتقال حرارت همرفتی برای اجسام کروی شکل تکی که در معرض جریان یک نوع گاز (هوا) قرار می‌گیرند، بر اساس رابطه (11) محاسبه شد (Geankoplis, 1978):

$$h_c = \left(\frac{k_a}{D}\right)\times\left(2.0+0.552\times Re^{0.53}\times Pr^{0.33}\right) \quad for \quad (1<Re<48000) \qquad (11)$$

h_c: ضریب انتقال حرارت همرفتی ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)، k_a: هدایت حرارتی هوا ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)، D: قطر انار (m)، Re: عدد رینولدز (بدون بعد)، Pr: عدد پرانتل (بدون بعد). مقادیر اعداد پرانتل 0/711، 0/711 و 0/712 و اعداد رینولدز 2860، 5622 و 7868 به‌ترتیب برای سرعت‌های 0/5، 1 و 1/3 متر بر ثانیه محاسبه گردید.

جدول 1- پارامترهای خنک‌کاری در مرکز و پوست انار در سرعت‌های $0.5\ m\ s^{-1}$، $1\ m\ s^{-1}$ و $1.3\ m\ s^{-1}$

Table 1- Cooling parameters in center and peel of pomegranate at different velocities $0.5\ m\ s^{-1}$

محل استقرار سنسور **Location of sensor**	فاکتور تاخیر **Lag factor** ***J*** (بدون بعد)	ضریب سرد شدن **Cooling coefficient** ***C*(s⁻¹)**	زمان نیمه سرد شدن **Half-cooling time** ***H*(s)**	زمان هفت- هشتم سرد شدن **Seven-eighths cooling time** ***S*(s)**	R^2	*E(%)
مرکز **Center**	1.1749ᵃ±0.02**	0.00028ᵇ±0.00	3051.18ᵃ±42.59	8002.23ᵃ±54.69	0.9936	3.27
پوست **Peel**	0.9959ᵇ±0.01	0.00033ᵃ±0.00003	2087.10ᵇ±75.94	6288.89ᵇ±258.82	0.9994	1.40
			$1\ m\ s^{-1}$			
محل استقرار سنسور Location of sensor	*J*	*C*(s^{-1})	*H*(s)	*S*(s)	R^2	E(%)
مرکز Center	1.2033ᵃ±0.01	0.00031ᵇ±0.00	2832.95ᵃ±33.04	7304.87ᵃ±33.04	0.9955	3.35
پوست Peel	0.9461ᵇ±0.04	0.00036ᵃ±0.00003	1771.50ᵇ±101.13	5622.32ᵇ±201.17	0.9991	2.09
			$1.3\ m\ s^{-1}$			
محل استقرار سنسور Location of sensor	*J*	*C*(s^{-1})	*H*(s)	*S*(s)	R^2	E(%)
مرکز Center	1.1618ᵃ±0.01	0.00031ᵇ±0.00	2719.73ᵃ±21.48	7191.65ᵃ±21.49	0.9935	3.34
پوست Peel	0.9135ᵇ±0.03	0.00041ᵃ±.00003	1469.94ᵇ±137.77	4851.15ᵇ±260.19	0.9971	3.02

*حداکثر اختلاف بین داده‌های آزمایش و رگرسیون

*Maximum difference between the experimental and regression data

**: میانگین ± (انحراف معیار). میانگین‌ها در هر ستون که دارای حروف مشابه می‌باشند، بر اساس آزمون دانکن در سطح 5٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

** Mean (± SD). In each column, the means followed by similar letter(s) are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's test

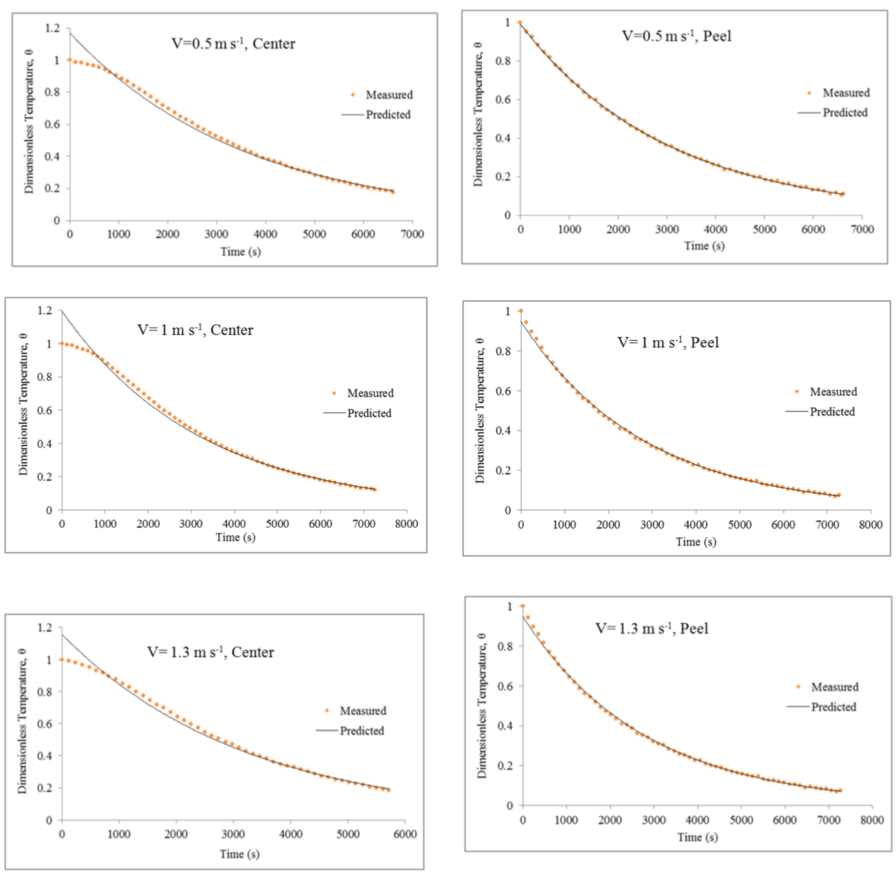
نتایج و بحث

نرخ سرد شدن

نرخ سرد شدن به همراه پارامترهای سرد شدن در مرکز و پوست انار در سرعت‌های 0/5، 1 و $1/3\ m\ s^{-1}$ در جدول 1 نشان داده شده است. در هر سرعت با افزایش شعاع انار از مرکز به پوسته بیرونی فاکتور تأخیر و زمان نیمه و هفت- هشتم سرد شدن کاهش و نرخ سرد شدن افزایش می‌یابد. تغییر در فاکتور تأخیر به شکل، اندازه و

خصوصیات گرمایی محصول وابسته است. همچنین، فاکتور تأخیر بزرگتر از 1، باعث ایجاد یک مقاومت داخلی در برابر انتقال حرارت در محصول می‌شود (Dincer, 1995a). بر این اساس در مرکز محصول و در شعاع نزدیک به مرکز، انتقال حرارت به کندی نسبت به پوست میوه انجام می‌شود (جدول 1). پارامترهای (J) و (C) به‌وسیله برازش داده‌های دمای بی بعد و زمان خنک‌سازی به‌دست آمد. با افزایش سرعت هوا ضریب سرد شدن (C) افزایش و زمان‌های سرد شدن (H) و (S) کاهش و نرخ سرد شدن افزایش یافت که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت دارد (Dincer, 1995a; Castro *et al.*, 2005).

البته باید توجه داشت که شکل و اندازه محصول نیز از عواملی است که می‌تواند نرخ سرد شدن را تحت تأثیر قرار دهد. در یک آزمایش که در آن از گوی‌های پلاستیکی (پلیمری) مشابه از نظر شکل و اندازه استفاده گردید، با افزایش سرعت هوا نرخ سرد شدن کاهش یافت (Castro *et al.*, 2005). با توجه به این‌که در آزمایش صورت گرفته در مطالعه حاضر، انارها به‌طور دقیق یک شکل نبودند، این مورد می‌تواند به‌طور جزیی پارامترهای سرد شدن (J) و (C) را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، علی‌رغم کاهش فاکتور تأخیر در زمان افزایش سرعت و در لایه‌های مرکز و پوست انار، به دلیل افزایش قابل‌ملاحظه در ضریب سرد شدن، زمان‌های سرد شدن (نیمه و هفت- هشتم سرد شدن) کاهش یافت (جدول 1). نتایج با نظر سایر محققین در مورد این که تغییر در فاکتور تأخیر به شکل، اندازه و خصوصیات گرمایی محصول وابسته است، مطابقت دارد (Dincer,1995). منحنی‌های سرد شدن (الگوی سرد شدن) انار در لایه‌های مختلف در شکل 2 نشان داده شده است. در تمامی منحنی‌ها هرچه به پایان فرآیند خنک‌کاری نزدیک می‌شویم، شیب منحنی‌ها کاهش پیدا می‌کند. به‌عبارت دیگر، در زمان‌های پایانی خنک‌کاری، به علت کمتر شدن اختلاف بین دمای مرکز و پوست انار و دمای هوای سرد، کاهش دما کندتر خواهد بود. دمای بی‌بعد (θ)، کمتر از 0/2 در سرعت‌های مختلف تأثیر کمی در نرخ سردشدن مرکز انار داشت.



شکل 2- نمودارهای سرد شدن در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد در مرکز و پوست انار

Fig. 2. Cooling curves (experimental and regression) at different airflow velocities in center and peel of pomegranate

با این حال نرخ سرد شدن در پوست (لایه بیرونی) در دمای بی‌بعد کمتر از 0/1 تأثیر کمی از خود به‌جای گذاشت. این نکته بیانگر این است که مرکز محصول در فرآیند انتقال حرارت حساسیت بیشتری نسبت به پوست میوه از خود نشان داده که باید در فرآیند پیش‌خنک‌کاری مد نظر قرار گیرد. بعد از 5000 ثانیه، تغییرات سرعت جریان هوای سرد اثر کمی در کاهش دمای مرکز و پوست انار داشت. این نتایج با گزارشات سایر محققین مطابقت دارد (Kumar *et al.*, 2008). حداکثر اختلاف بین داده‌های آزمایش و رگرسیون در مرکز و پوست انار به‌ترتیب 3/35 و 3/02 بود که قابل قبول می‌باشد. این مقدار اختلاف در زمان‌های اولیه سرد شدن (500-0 ثانیه) و در فاکتورهای تأخیر بالا (بیشتر از 1) اتفاق افتاده که بیانگر یک مقاومت داخلی در انتقال حرارت در برابر جریان هوا در محصول می‌باشد (Dincer, 1995a). شروع سرد شدن در مرکز انار با یک تأخیر زمانی شروع شده که باعث می‌گردد ابتدای منحنی سرد شدن نسبت به قسمت‌های پایین مسطح باشد. دلیل این موضوع، فاصله مرکز انار از هوای سرد در زمان خنک شدن محصول می‌باشد. یافته‌های یک پژوهش نیز نشان داد که مرکز سیب‌زمینی‌هایی که در لایه‌های بالاتری نسبت به هوای سرد قرار داشتند، با یک تأخیر زمانی سرد شدند (Lindsay *et al.*, 1983). زمان هفت- هشتم سرد شدن جزیی از زمان نیمه سرد شدن است؛ یعنی مجموع سه زمان نیمه سردشدن، معادل زمان هفت- هشتم سردشدن خواهد بود. دامنه (S) در این تحقیق، H 3/5-2/5 می‌باشد (جدول 2). در سیستم‌هایی که میزان سردکردن سریع است، تغییرات دمای درون محصول (مرکز) کندتر از تغییرات دمایی سطح آن (پوست) است. در چنین مواردی عامل محدودکننده، هدایت دما از درون به سطح است. این حالت می‌تواند اختلاف نسبی میان (S) و (H) را تغییر دهد.

جدول 2- نسبت زمان هفت- هشتم به زمان نیمه سرد شدن در مرکز و پوست انار

Table 2-The ratio of S/H in center and peel of pomegranate

سرعت جریان هوا **Airflow velocity (m s^{-1})**	مرکز **Center**	پوست **Peel**
0.5	$2.62^{a}\pm0.02^{*}$	$3.01^{b}\pm0.04$
1	$2.58^{a}\pm0.03$	$3.17^{ab}\pm0.24$
1.3	$2.64^{a}\pm0.06$	$3.30^{a}\pm0.13$

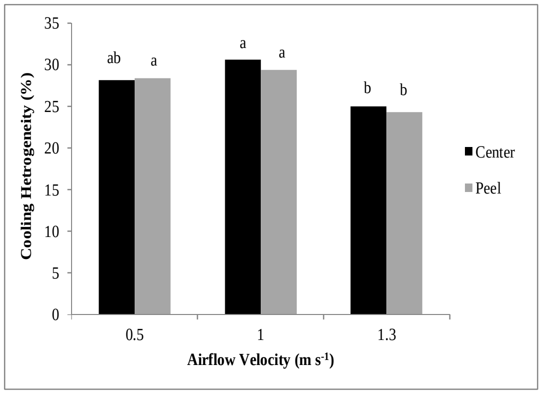
*: میانگین±(انحراف معیار). میانگین‌ها در هر ستون که دارای حروف مشابه می‌باشند بر اساس آزمون دانکن در سطح 5٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

* Mean (± SD). In each column, the means followed by similar letter(s) are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's test.

غیریکنواختی سرد شدن

مطابق شکل 3، غیریکنواختی سرد شدن در ابتدا (سرعت 0/5 m s^{-1}) در مرکز و پوست انار کم (یکنواختی سردشدن زیاد) بوده و سپس با افزایش سرعت به 1 m s^{-1} افزایش و در سرعت 1/3 m s^{-1} نیز کاهش می‌یابد.

در یک مطالعه با انجام آزمایشی روی گوی‌های پلاستیکی (پلیمری) نشان داده شد که غیریکنواختی در سرعت 0/030 m s^{-1}، 0/505 بود که از غیریکنواختی در سرعت 0/128 m s^{-1} (0/534) کمتر بود و پس از آن، با افزایش سرعت تا 1/043 m s^{-1} این غیریکنواختی کاهش یافت (0/409) (Castro *et al.*, 2005). دلیل این امر تأثیر نیروی جاذبه در سرعت کمتر گزارش گردید. این در حالی بود که زمان نیمه سرد شدن در سرعت 0/030 m s^{-1}، 2/6 برابر بیشتر از این زمان در سرعت 0/5 m s^{-1} بود. همچنین، در یک پژوهش گزارش شد که سرعت 0/024 ms^{-1} در برخورد به گوی‌های پلاستیکی، یکنواختی بیشتری در توزیع هوا نسبت به سرعت ms^{-1} 0/111 ایجاد نمود که دلیل احتمالی آن را تأثیر همرفت طبیعی ذکر نمودند (Castro *et al.*, 2004). نتایج به‌دست آمده از این آزمایش یک وارونگی از سرعت 0/5 به 1 ms^{-1} را نشان می‌دهد؛ زیرا انتظار می‌رفت که با افزایش سرعت جریان هوای سرد، غیریکنواختی کاهش یابد؛ به‌طوری‌که از سرعت 1 به 1/3 ms^{-1} مشاهده گردید. این یافته‌ها با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات قبلی انجام شده مطابقت دارد. بعد از یک دوره زمانی سرد شدن (5000 ثانیه)، تقریباً تمام لایه‌های انار به یک دمای نزدیک به‌هم رسیده و بنابراین، غیریکنواختی در لایه‌های مختلف کاهش می‌یابد. نتایج یک مطالعه نیز نشان داد که ستون لایه‌های گوی‌های پلاستیکی بعد از یک دوره زمانی معین، تقریباً هم دما شد که در این صورت، غیریکنواختی سرد شدن در لایه‌ها کاهش یافت (Dehghannya *et al.*, 2011). نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر در مورد مرکز و لایه پوست انار نیز در تطابق با این گزارش بود.



شکل 3- غیریکنواختی سرد شدن در سه سطح سرعت جریان هوا در مرکز و پوست انار

Fig. 3. Cooling heterogeneity at three levels of airflow velocity in center and peel of pomegranate

میانگین‌های با حروف مشابه، بر اساس آزمون دانکن در سطح 5٪ اختلاف معنی داری ندارند.

Means with the same letter(s) are not significantly different at the 5% probability level using Duncan's test.

شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای

با توجه به فاصله مرکز انار از جریان هوای سرد نسبت به پوست میوه، این نقطه با فاصله زمانی بیشتری سرد می‌شود. بنابراین، لازم است سرعت جریان هوای سردی انتخاب گردد تا در واحد زمان، دمای بیشتری را از مرکز محصول خارج سازد. حداکثر شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای در مرکز انار با مقدار $8/09 \times 10^{-4}$ $^{o}C\ s^{-1}$ مربوط به سرعت $1/3\ m\ s^{-1}$ بود (جدول 3). دلیل افزایش مقدار شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای در مرکز در سرعت $0/5\ m\ s^{-1}$ نسبت به سرعت $1\ m\ s^{-1}$ را می‌توان به اثر نیروی جاذبه و همرفت طبیعی در سرعت‌های پایین جریان هوای سرد ربط داد (Castro *et al.*, 2004; 2005). با توجه به این‌که گرادیان دما در مرکز انار نسبت به هوای سرد خنک‌کننده بیشتر از گرادیان دما در پوست میوه نسبت به ماده خنک‌کننده بود، در تمام سرعت‌های جریان هوای سرد (0/5، 1 و $1/3\ m\ s^{-1}$)، شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای در مرکز محصول بیشتر از پوست میوه به‌دست آمد (جدول 3).

جدول3- شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای مرکز و پوست انار در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد

Table 3- Instantaneous cooling rate in center and peel of pomegranate at different airflow velocities

سرعت جریان هوا Airflow velocity($m\ s^{-1}$)	شدت خنک‌کنندگی لحظه‌ای مرکز Instantaneous cooling rate of center ($^{o}C\ s^{-1}$)×10^{-4}	شدت خنک‌کنندگی پوست Instantaneous cooling rate of peel ($^{o}C\ s^{-1}$)×10^{-4}
0.5	7.28	5.15
1	6.55	3.09
1.3	8.09	3.09

اثر سرعت جریان هوای سرد بر ضریب انتقال حرارت همرفتی

افزایش انتقال حرارت (افزایش خنک‌کاری) در محصول وابسته به افزایش ضریب انتقال حرارت است که آن نیز به نوبه خود به‌وسیله تغییر در سرعت جریان هوای سرد تغییر می‌یابد. با افزایش سرعت جریان هوای سرد از 0/5 به 1 و $1/3\ m\ s^{-1}$، ضریب انتقال حرارت همرفتی از 11/05 به 15/75 و $17/51\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$ افزایش یافت. با توجه به این‌که اندازه و دمای انارهای آزمایش و دمای جریان هوای سرد تقریباً یکسان بود، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت جریان هوای سرد یک عامل مهم در تغییر ضریب انتقال حرارت همرفتی و در نتیجه، افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد. بر این اساس، با افزایش سرعت جریان هوای سرد از 0/5 به $1/3\ m\ s^{-1}$، ضریب انتقال حرارت 58/46 ٪ افزایش پیدا کرد (جدول 4).

کاهش جرم میوه

بر اساس داده‌های آزمایشی (جدول 5)، تأثیر سرعت جریان هوا روی کاهش جرم میوه کم بود. بنابراین، این پارامتر در محاسبات خنک شدن محصول مورد توجه قرار نگرفت.

جدول 4- ضریب انتقال حرارت و عدد رینولدز در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد

Table 4- Convective heat transfer coefficient and Reynolds number at different airflow velocities

سرعت جریان هوا **Airflow velocity (m s^{-1})**	ضریب انتقال حرارت همرفتی **Convective heat transfer coefficient (W m^{-2} K^{-1})**	عدد رینولدز **Reynolds number (Dimensionless)**
0.5	11.05	2860
1	15.75	5622
1.3	17.51	7868

جدول 5- درصد کاهش جرم در سرعت‌های مختلف جریان هوای سرد

Table 5- Percent of weight loss at different airflow velocities

سرعت جریان هوا **Airflow velocity (m s^{-1})**	جرم اولیه **Initial mass (g)**	جرم نهایی **Final mass (g)**	کاهش وزن **Mass loss (%)**
0.5	334.13	333.39	0.22
1	347.46	346.74	0.21
1.3	355.47	354.90	0.16

نتیجه‌گیری

کارایی سرد شدن بر اساس دو پارامتر سرعت و یکنـواختی سـرد شدن ارزیابی می‌شود. نمودارهای سرد شدن در برابر زمان برای مرکز و پوست انار در سرعت‌های مختلف جریـان هـوا بـه‌صـورت نمـایی کاهش پیدا کردند. بـا افـزایش سـرعت جریـان هـوا، زمـان نیمـه و هفت- هشتم سرد شدن کاهش و نرخ سرد شدن افزایش یافـت کـه تأثیر مستقیم سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. این کاهش به دلیل تغییر در ضریب انتقال حرارت می‌باشد. کمترین میزان غیریکنـواختی در بالاترین سرعت ($1/3$ m s^{-1}) به‌دست آمد که باعث شد توزیع دما در میوه یکنواخت‌تر باشد. نتایج نشان داد که روش اسـتفاده شـده در این آزمایش می‌تواند برای میوه‌هایی که مثل انار شبیه کره می‌باشند به‌کار رفته و بدون استفاده از محاسبات پیچیده، انتقال حرارت ناپایا را در فرآیند سرد شدن توضیح دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق و ملاحظات طراحی دستگاه (دور فن و غیره) در یک انار تکی، سرعت جریان هوای $1/3$ m s^{-1} برای انجام خنک‌کاری با هوای سرد اجباری در این میوه توصیه می‌شود.

References

1. Anon. 1994. ASHRAE handbook: Method of precooling fruit, vegetables, and cut flowers. Refrigeration Systems and Applications.
2. AOAC, 1980. Official methods of analysis. AOAC, 13th edition, No. 22.013, p 361.
3. Askari Ardeh-Asli, E. 2006.Postharvest Technology.Yavaran publication, Iran, PP 430-431. (In Farsi).
4. Brosnan, T., and D. Sun. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products – a review. International Journal of Refrigeration 32: 154-170.
5. Castro, L. R., C. Vigneault, and L. A. B. Cortez. 2004. Effect of container opening area on air distribution during precooling of horticultural produce. Transactions of the ASAE 47 (6): 2033-2038.
6. Castro, L. R., C. Vigneault, and L. A. B. Cortez. 2005. Cooling performance of horticultural produce in containers with peripheral openings. Postharvest Biology and Technology 38: 254-261.
7. Dehghannya, J., M. Ngadi, and C. Vigneault. 2011. Mathematical modelling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas. Food Control 22: 1393-1399.
8. Dennis, C. 1984. Effect of storage and distribution conditions on the quality of vegetables. Acta Horticulture 163: 85-104.
9. Dincer, I. 1993. Heat transfer coefficients in hydrocooling of spherical and cylindrical food products. Energy 18 (4): 335-340.
10. Dincer, I. 1995a. Airflow precooling of individual grapes. Journal of Food Engineering 26: 243-249.
11. Dincer, I. 1995b. Development of Fourier-Reynolds correlations for cooling parameters. Applied

Energy 51: 125-138.
12. Dincer, I. 1996. An exact solution on the estimating of heat transfer rates during deep-freezing of slab products. Journal of Food Engineering 30: 417-423.
13. Dincer, I., and S. Dost. 1996. New correlations for heat transfer coefficients during direct cooling of products. International Journal of Energy Research 20 (7): 587-594.
14. Dincer, I. 1997. New effective Nusselt-Reynolds correlations for food cooling applications. Journal of Food Engineering 31: 59-67.
15. Emond, J. P., F. Mercier, S. O., Sadfa, M. Bourre, and A. Gakwaya. 1996. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced air precooling of strawberry. Transactions of the ASAE 39 (6): 2185-2191.
16. Fadavi, A., M. Barzegar, and M. H. Azizi. 2006. Determination of fatty acids and total lipid content in oilseed of 25 pomegranates varieties grown in Iran. Journal of Food Composition Analysis 19: 676-680.
17. Fikiin, A. G. 1983. Investigating the factors of intensifying fruits and vegetable cooling. International Journal of Refrigeration 6: 176-181.
18. Geankoplis, C. J. 1978. Transport Processes and Unit Operations. Allyn and Bacon, Boston, MA.
19. Golob, P., G. Farrell, and G. E. Orchard. 2002. Postharvest science and technology, Principles and practices.Vol. 1. Blackwell Science, p. 554.
20. Guillou, R. 1960. Forced air fruit cooling. Transactions of the ASAE 3 (2): 16-18.
21. Guillou, R. 1970. Precooling in the west. ASHRAE Symposium on Precooling Fruits and Vegetables 4: 3-11.
22. Hass, E., G. Felsenstein, A. Shitzer, and G. Manor. 1976. Factors affecting resistance to airflow through packed fresh fruit. ASHRAE Transactions 82 (2): 548-554.
23. Iranmanesh, M., and M. Malekyarand. 2012. Postharvest physiology (fruits & vegetables). Scientific and Applied Education Institute Publication. (In Farsi).
24. Kader, A. A. 2002. Postharvest technology of horticultural crops. Cooperative Extension of University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, University of California, Davis, CA, Publication No. 3311.
25. Kumar, R., A. Kumar, and U. N. Murthy. 2008. Heat transfer during forced air precooling of perishable food products. Biosystems Engineering 99: 228-233.
26. Lambrinos, G., H. Assimaki, H. Manolopoulou, E. Sfakiotakis, and J. Porlimgis. 1997. Air precooling and hydrocooling of Hayward kiwifruit. Acta Horticulture 444: 561-566.
27. Lindsay, R. T., M. A. Neale, and H. J. M. Messer. 1983. Ventilation rates for positive ventilation of vegetables in bulk bins. Journal of Agricultural Engineering Research 28 (1): 33-44.
28. Mohseni, A. 2009. Identification and introduction of the best pomegranate exportcultivars in Iran. Office of Tropical and Subtropical Fruits. Publications of Agricultural Education. P. 38. (In Farsi).
29. Nalbandi, H., H. R. Ghasemzadeh, S. Seiidlou, F. Ranjbar, and J. Dehghanniya. 2014. Mathematical modelling of airflow and heat transfer during forced-air cooling of strawberries. ISESCO JOURNAL of Science and Technology 10 (17): 69-76.
30. Smale, N. J., J. Moureh, and J. Cortella. 2006. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. International Journal of Refrigeration 29: 911-930.
31. Thompson, J. F., F. G. Mitchel, T. R. Rumsey, R. F. Kasmire, and C. H. Crisosto. 1998. Commercial cooling of fruits, vegetables, and flowers. University of California., ANR Publication 21567.
32. Zou, Q., O. U. Linus, and R. A. Mckibbin, 2006a. CFD modelling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. Journal of Food Engineering 77 (4): 1037-1047.
33. Zou, Q., O. U. Linus, and R. A. Mckibbin. 2006b. CFD modelling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: II. Computational solution, software development and model testing. Journal of Food Engineering 77 (4): 1048-1058.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 1, Spring - Summer 2018, p. 79-91

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد 8، شماره 1، نیمسال اول 1397، ص 91-79

Effect of Airflow Velocity on Pre-cooling Process of Pomegranate by Forced Cooling Air under Unsteady State Heat Transfer Condition

M. A. Behaeen[1*]- A. Mahmoudi[2]- S. F. Ranjbar[3]
Received: 05-08-2015
Accepted: 23-02-2016

Introduction

Pomegranate (*Punica grantum* L.) is classified into the family of Punicaceae. One of the most influential factors in postharvest life and quality of horticultural products is temperature. In precooling, heat is reduced in fruit and vegetable after harvesting to prepare it quickly for transport and storage. Fikiin (1983), Dennis (1984) and Hass (1976) reported that cold air velocity is one of the effective factors in cooling vegetables and fruits. Determining the time-temperature profiles is an important step in cooling process of agricultural products. The objective of this study was the analysis of cooling rate in the center (arils) and outer layer (peel) of pomegranate and comparison of the two sections at different cold air velocities. These results are useful for designing and optimizing the precooling systems.

Materials and Methods

The pomegranate variety was Rabab (thick peel) and the experiments were performed on arils (center) and peel (outer layer) of a pomegranate. The velocities of 0.5, 1 and 1.3 m s^{-1} were selected for testing. To perform the research, the cooling instrument was designed and built at Department of Biosystems Engineering of Tabriz University, Tabriz, Iran. In each experiment six pt100 temperature sensors was used in a single pomegranate. The cooling of pomegranate was continued until the central temperature reached to 10°C and then the instrument turned off. The average of air and product temperatures was 7.2 and 22.2°C, respectively. The following parameters were measured to analyze the process of precooling: a) Dimensionless temperature (θ), b) Cooling coefficient (C), c) Lag factor (J), d) Half-cooling time (H), e) Seven-eighths cooling time (S), f) Cooling heterogeneity, g) Fruit mass loss, h) Instantaneous cooling rate, and i) convective heat transfer coefficient.

Results and Discussion

At any air velocity, with increasing the radius from center to outer layer, the lag factor decreased and cooling coefficient increased. Also, half-cooling time and seven-eighths cooling time reduced and so cooling rate enhanced. Thus, despite a reduction lag factor, due to a significant increase in cooling coefficient, half and seven-eighths cooling declined. Dimensionless temperature, θ, less than 0.2 and 0.1 in the center and peel and at different velocities had little impact on the rate of cooling in pomegranate. The difference in primary cooling time (0-500 sec) and in high lag factor (greater than 1) occurred, which represents an internal resistance of heat transfer in fruit against the airflow. Cooling the center of pomegranate starts with time delay which causes the beginning of the cooling curve becomes flat. Seven-eighths cooling time is the part of half-cooling time. The range of S was 2.5-3.5H in the present study. At first, cooling heterogeneity at 0.5 m s^{-1} was low in the center and peel of pomegranate and then with increasing the velocity up to 1 m s^{-1}, it enhanced and again decreased at 1.3 m s^{-1}. After a period of cooling (5000 sec), almost layers of pomegranate reached the same temperature and so heterogeneity reduced. The maximum instantaneous cooling rate was 8.09×10^{-4} ºC s^{-1} at 1.3 m s^{-1} in the center of pomegranate. By increasing the airflow velocity from 0.5 to 1.3 m s^{-1}, the convective heat transfer coefficient increased from 11.05 to 17.51 W m^{-2} K^{-1}. Therefore, the velocity of cold air is an important factor in variation of convective heat transfer coefficient.

Conclusions

Cooling efficiency is evaluated based on rapid and uniformity of cooling. Cooling curves against time

1- Ph.D. Student of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Tabriz University
2- Associate Professor of Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Tabriz University
3- Associate Professor of Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Tabriz University
(*- Corresponding Author Email: ali_behaeen@yahoo.com)

reduced exponentially at the different airflow velocities in the center (aril) and outer layer (peel) of pomegranate. By increasing the air flow velocity, half and seven-eighths cooling time reduced and cooling rate increased that showed direct impact of this variable. The main reason was the variation of convective heat transfer coefficient. The lowest level of uniformity obtained at the highest velocity (1.3 m s^{-1}), which made more uniform temperature distribution in the fruit. The results showed that applied method in this experiment could be used for the fruits which are similar to sphere and could explain the unsteady heat transfer without complex calculations in the cooling process. Based on the results of this research, the airflow velocity of 1.3 m s^{-1} is recommended for forced air precooling operations of pomegranate.

Keywords: Cooling rate, Pomegranate, Precooling, Unsteady heat transfer